

고압회전기 고정자 권선의 절연상태 평가

김 희 동

한국전력공사 전력연구원 발전연구실 I&C그룹 선임연구원

1. 머리말

고압회전기 고정자 권선의 주절연재료로 마이카/에폭시 복합재료가 사용되고 있으며, 운전중에 열적, 기계적, 전기적 응력(Stress) 및 외부환경에 의한 열화요인이 단독 혹은 복합적으로 작용한다. 열적요인은 열응력과 열분해로 분류되는데, 열응력은 기계적 응력과 더불어 균열(Crack)을 발생시키고 열분해는 에폭시의 분해에 의한 가스압력이 증가하여 접착강도를 저하시켜 계면에서 박리를 발생시킨다. 기계적 응력은 마이카/에폭시 계면과 에폭시 리치(Rich)부분에서 각각 미소 균열을 발생시키고 동시에 이미 다른 원인에 의해 생성된 균열을 확대시킨다. 전기적 응력은 박리(Delamination), 균열과 같은 결함부분에서 부분방전이 발생하여 유전정접의 증가, 코로나 침식 및 트리(Tree)가 진행하다가 마이카 조각이 존재하면 진전이 억제된다.

절연열화의 최종단계에서는 독립적으로 발생된 미소 균열이 상호결합하며, 이 부분에서 트리가 급속히 진전하여 절연파괴에 이른다^{(1),(2)} 외부환경에 의한 열화는 먼지,

오일 및 습분의 유입으로 인해 고정자 권선 표면에서 오손이 발생한다. 따라서 고압회전기 고정자 권선의 절연열화상태와 열화정도를 평가하기 위해 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하고 있다.⁽³⁾

본고에서는 발전소에 설치되어 운전중인 발전기 120대 및 고압전동기 2,800대를 전력연구원에서 정지중(Off-line) 절연진단을 수행하여 얻은 데이터를 근거로 고정자 권선의 절연상태 평가와 분석법을 제시하였다. 절연진단 시험에서는 교류전류, 유전정접, 부분방전 크기 및 패턴 등을 측정하여 종합적인 평가와 분석을 통해 고압회전기의 절연상태를 양호, 요주의, 분해점검, 절연보강 및 권선교체 등으로 분류해서 판정하였다.

2. 절연진단 시험 표준 및 주기 설정

가. 절연진단 시험 표준

발전기 및 고압전동기 정밀 절연진단 시험에 포함되는 절연저항, 성극지수, 유전정접 및 부분방전 등에 관한 국제적인 표준(Standards)은 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 발전기 및 고압전동기의 시험 표준

시험의 종류	진단 시험 표준
절연저항	IEEE Std 43/NEMA MG1
성극지수	IEEE Std 43/NEMA MG1
유전정접	IEEE Std 286/BS Std 4999, Part 144/ASTM Std D 150
부분방전	IEEE Std 1434/IEC 270/ASTM Std D 1868

나. 절연진단 주기설정

대형발전기 고정자 권선은 초년도 계획예방정비 공사 시 회전자를 인출하여 내부점검후 5년마다 육안점검을 시행하고 있으며, 고압전동기 고정자 권선에 비해 절연상태가 매우 양호하기 때문에 운전 연수에 상관없이 5년마다 절연진단을 수행하고 요주의 판정시에 매년 절연진단을 통해 트렌드 관리가 필요하다. 한전 전력연구원에서는 각 발전회사의 절연진단 의뢰 건수가 많고 발전기 120대 및 고압전동기 2,800대의 절연진단 결과를 근거로 표 2와 같이 절연진단 주기를 설정하여 수행하고 있다. 그리고 GE에서는 발전기 고정자 권선의 점검 주기를 표 3과 같이 권고하고 있다⁽⁴⁾.

3. 시험방법

본 논문은 정지중에 고압회전기 고정자 권선에서 절연진단 시험을 수행하였다. 정지중에 고정자 권선의 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험을 위해 슈링브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(Coupling Capacitor) 및 부분방전 측정기(Partial Discharge Detector : PDD, Tettex Instruments TE 571)를 사용하였다. 슈링브리지는 전원장치(HV Supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(Rsonating Inductor, Type 5285)로 구성되어 있다.

그림 1에 고압회전기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정

〈표 2〉 발전기 및 고압전동기 절연진단 주기

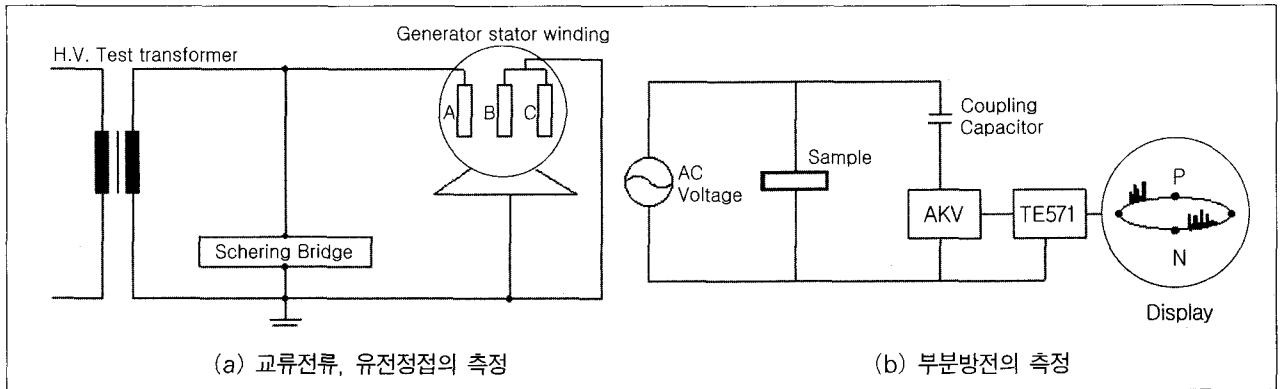
회전기의 종류	운전연수	진단주기	요주의 판정
발전기	운전연수와 무관	5년마다 진단	매년 진단
	10년 이하	5년마다 진단	매년 진단
고압전동기	국산	10년 이상	3년마다 진단
		15년 이하	5년마다 진단
	외산	15년 이상	3년마다 진단
		15년 이하	5년마다 진단

〈표 3〉 발전기 고정자 권선의 점검주기

시험의 종류	점검주기		비고
	2년 6개월 (Rotor In)	5년 (Rotor Out)	
High Potential Test	○	○	
Megger	○	○	
Visual Inspection	○	○	
Wedge Tightness		○	
End Winding Impact Test		○	선택적 시험
Winding Resistance	○	○	
Winding Leak Tightness	○	○	수냉각 권선
Bar Insulation Capacitance		○	수냉각 권선

접 및 부분방전을 측정하기 위한 회로도를 나타내었다. 고압회전기 고정자 권선에 웨빙브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유닛(Coupling Unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40~400kHz이다.

그림 1(a)에서 나타낸 바와 같이 발전기는 캐패시턴스(Capacitance) 용량이 크기 때문에 중성점을 분리하여 상별로 진단하고 고압전동기는 3상 일괄로 절연진단을 수행하고 있다. 캐패시턴스 용량은 고정자 권선의 주절연



〈그림 1〉 고압회전에서 절연진단 시험

재료(C_{in}), 권선의 반도체재료와 슬롯사이의 공극(C_{air})의 크기에 따라 주로 결정된다. 500MW 표준석탄화력발전기 한상의 캐패시턴스 용량이 대략 242(nF)이며, 300MW 양수발전기는 약 800(nF) 정도이다.

4. 시험결과 및 고찰

가. 양호

발전기 및 고압전동기의 절연진단 데이터를 분석한 결과, 교류전류, 유전정점 및 부분방전 등이 모두 기준값 이하로 나타나면 고정자 권선의 절연상태를 양호하게 판정한다. 발전기 120대 및 고압전동기 2,800대를 진단한 결과 발전기 120대 및 고압전동기 2,550대는 양호하게 판정되었다. 실제로 양호하게 판정된 고압전동기 3대가 운전중에 절연파괴가 발생하였는데, 1대는 정비시에 이물질 유입으로 인해 시운전중에 절연파괴되고 다른 1대는 옥외에 설치되어 우천시에 빗물 누입으로 인해 절연파괴되었다. 그리고 나머지 1대는 실내에 설치되었으나 고정자 권선의 주절연재료 내부에서 턴과 턴 사이의 단락으로 절연파괴 되었다. 따라서 전력연구원에서도 턴단락을 진단하기 위해 서지(Surge) 시험장비(Advanced Winding Analyzer III with PP30, Baker)를 구매하

여 절연진단의 신뢰도를 향상시키고 있다. 본 장비는 DC 30kV까지 인가할 수 있어 저압전동기부터 고압전동기(13.2kV)까지 시험이 가능하다.

서지 시험은 발전기와 고압전동기 운전중에 나타날 수 있는 급격한 과도현상에 견딜 수 있는지를 사전에 확인하기 위해 주절연과 턴(Turn)절연의 건전성 여부를 파악하는 시험이다. 이 시험은 일반적으로 공장에서 제작된 고정자 권선에 대해 실시하거나 정비전에 이상이 있는지의 여부를 검사하기 위한 시험방법이며, 턴절연에 순간적으로 전압을 인가하여 절연상태가 불량할 경우에 절연이 파괴된다.

나. 요주의(매년 진단)

고압전동기의 절연진단 데이터를 분석한 결과 교류전류, 유전정점 및 부분방전 중에 두 항목이 양호하고 한 항목이 불량하면 요주의로 판정하고 매년 진단을 수행한다. 고압전동기 2,800대를 진단한 결과 대략 45대 정도가 요주의로 판정되어 매년 절연진단을 수행하고 있다. 주기적으로 매년 절연진단을 실시하여 트렌드(Trend)에 의한 데이터 관리를 통해 절연열화 정도와 추이를 분석함으로써 재권선 시점을 적절하게 판단하여 경비절감, 안정적

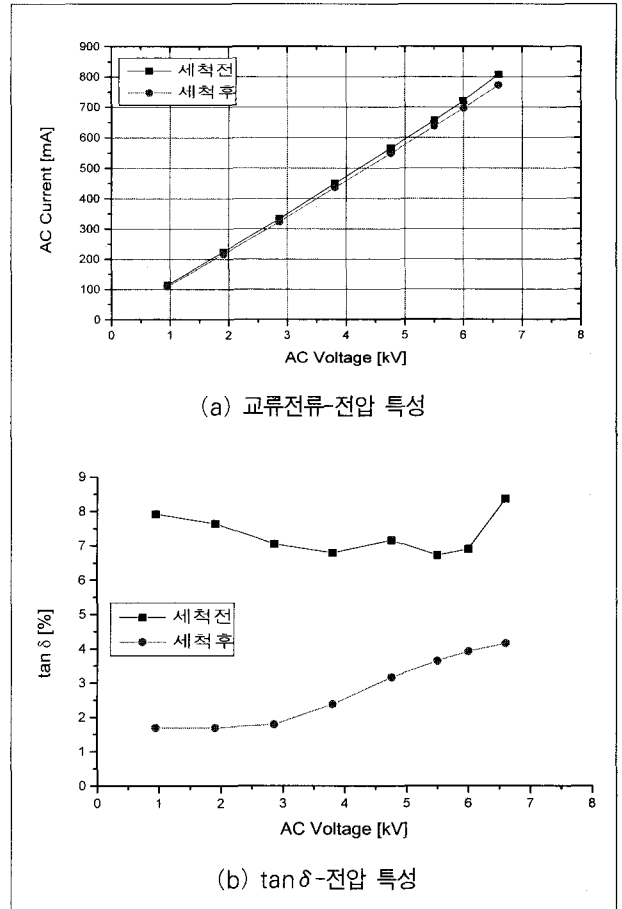
인 운전 및 예측정비를 수행할 필요가 있다.

다. 분해점검

현재 대부분의 화력발전소에서 고압전동기 정밀 분해점검을 3년마다 시행하고 있으나 사용환경에 따라 정비주기를 단축하는 것이 필요하다. 특히 미분기용 고압전동기는 분진의 흡입 가능성이 매우 높기 때문에 매년 정밀 분해점검을 실시하고, 평소 운전시 베어링 오일의 유입 가능성이 높거나 환경적으로 취약한 고압전동기도 역시 매년 점검을 시행할 필요가 있다. 그리고 초년도 계획예방 정비공사 중에 모든 고압전동기를 정밀 분해점검하여 건설공사 기간 동안 먼지 유입에 의한 고정자 권선 상태와 시운전 기간 동안 빈번한 기동정지에 의한 손상 여부를 파악하여 기기마다 점검 주기를 다르게 설정해 놓으면 향후 설비 유지정비에 큰 도움이 될 것이다.

고압전동기 2,800대를 진단한 결과 대략 90대 정도가 고정자 권선 내부에서 분진, 베어링 오일과 같은 이물질 유입으로 판정되어 분해점검을 시행하였다. 그림 2는 화력발전소에서 15년 동안 운전한 고압전동기(1,400kW, 6.6kV) 고정자 권선에서 정밀 분해점검 전후에 교류전류와 유전정점의 변화를 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 나타난 바와 같이 분해점검 전후에 교류전류 자체는 큰 변화가 없지만 $\Delta I(\%)$ 는 약간 감소하였다. 그림 2(b)와 같이 유전정점은 현저한 차이를 보이고 있는데 분해점검 전에는 이물질 유입에 따라 $\tan\delta$ -전압 특성이 증감을 반복하고 있다.

그러나 회전자를 분리하고 세척하여 건조한 후에 측정 한 유전정점 특성은 양호하게 분석되었다. 또한 부분방전 크기도 먼지와 같은 이물질이 유입되어 있으면 초기에 크게 나타나다가 고전압에 의해 먼지가 타버리면 다시 감소한다. 특히 고정자 권선의 절연상태가 양호하여도 단말권선(Endwinding)이 이물질로 유입되어 있으면, 표면 트

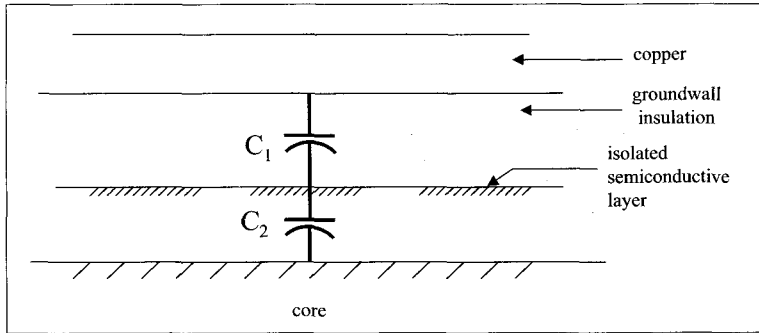


〈그림 2〉 분해점검 전후에 교류전류와 유전정점의 비교

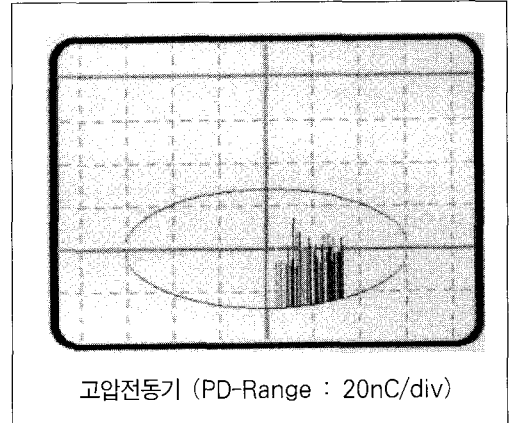
랙킹이 발생하여 절연과피가 발생할 수 있다⁽⁵⁾.

라. 절연보강(재함침)

그림 3과 4에서 나타난 바와 같이 고정자 권선 표면의 코일과 슬롯의 상대적인 움직임으로 인해 마모되어 반도전층을 손상시키면 슬롯방전이 발생한다.⁽⁶⁾ 반도전층이 손상됨에 따라 일부 권선의 접지상태는 나빠지고 권선 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에 방전을 일으킨다.⁽⁷⁾ 이와 같이 슬롯방전의 크기가 크게 나타날 때 절연보강을 판정한다. 고압전동기 2,800대를 진단한 결과 대



〈그림 3〉 슬롯방전의 전기적 모델



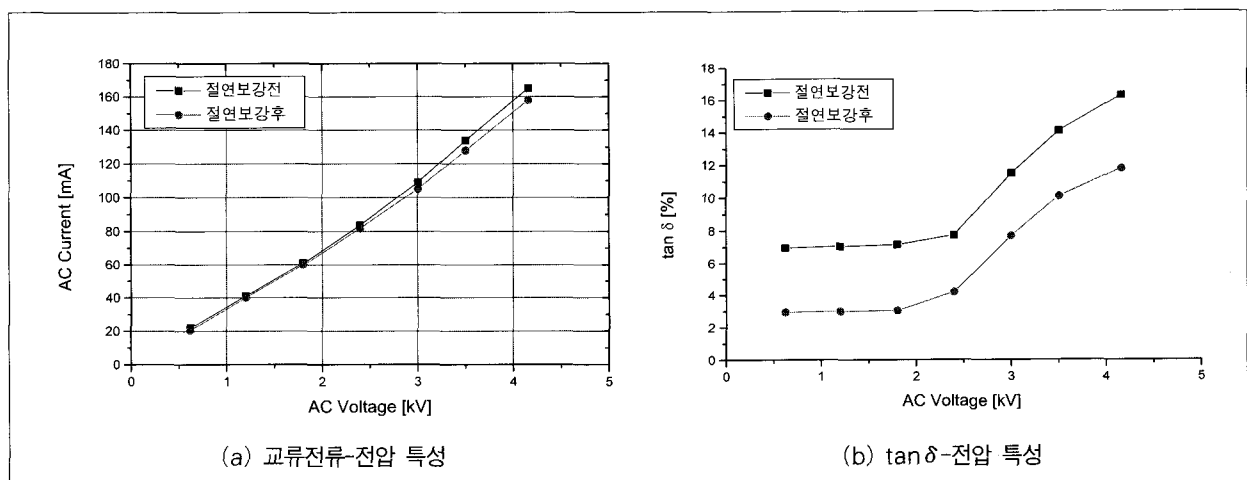
〈그림 4〉 슬롯방전의 패턴

략 65대 정도가 그림 3과 같이 슬롯방전으로 판정되어 절연보강을 시행하였다. 그림 5는 원자력발전소에서 20년 동안 운전한 고압전동기(260kW, 4.0kV) 고정자 권선에서 절연보강 전후에 교류전류와 유전정점의 변화를 나타내었다. 그림 5(a)에서 나타낸 바와 같이 절연보강 전에 교류전류 자체는 큰 변화가 없지만 ΔI (%)는 약간 감소하였다. 그림 5(b)와 같이 유전정점 특성은 현저한 차이를 보이고 있는데 절연보강 전에 비해 유전정점값이 크게 감소하였다.

또한 부분방전 크기도 절연보강 전에 비해 현저하게 감

소하는 것은 재합침시에 바니시가 슬롯과 고정자 권선 사이에 양호하게 유입되기 때문이다. 예를 들면, 슬롯방전에 의한 부분방전 크기가 절연보강 전에 10,000~30,000pC으로 크게 나타나도 보강후에는 3,000~5,000pC으로 감소한다.

표 4는 3년 정도 운전해 온 소형발전기((9,900kW, 11kV))에서 고정자 권선과 슬롯사이의 틈새에 레진주입 작업 전후에 절연진단 결과를 나타낸 것이다. 교류전류



〈그림 5〉 절연보강 전후에 교류전류와 유전정점의 비교

〈표 4〉 발전기의 절연진단 결과

상별	ΔI (%)		$\Delta \tan \delta$ (%)		부분방전 크기(pC)	
	주입전	주입후	주입전	주입후	주입전	주입후
A상	5.70	4.64	2.40	1.57	11,000	3,100
B상	2.36	1.81	1.36	0.91	8,700	2,400
C상	3.57	3.29	1.47	0.98	7,800	4,400

(ΔI), 유전정접($\Delta \tan \delta$) 및 부분방전 크기가 감소한 것은 레진주입이 절연보강과 같은 효과를 나타내기 때문이다.

마. 권선 교체

고압회전기 고정자 권선 교체도 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등에 의해 평가하는데, 절연열화로 인해 주절연 내부에 공극이 발생하여 내부방전이 크게 나타나거나 도체표면에서 부분방전이 발생할 때 권선 교체를 판정한다. 고압전동기 2,800대를 진단한 결과 대략 50대 정도가 불량으로 판정되어 권선 교체를 시행하였다.

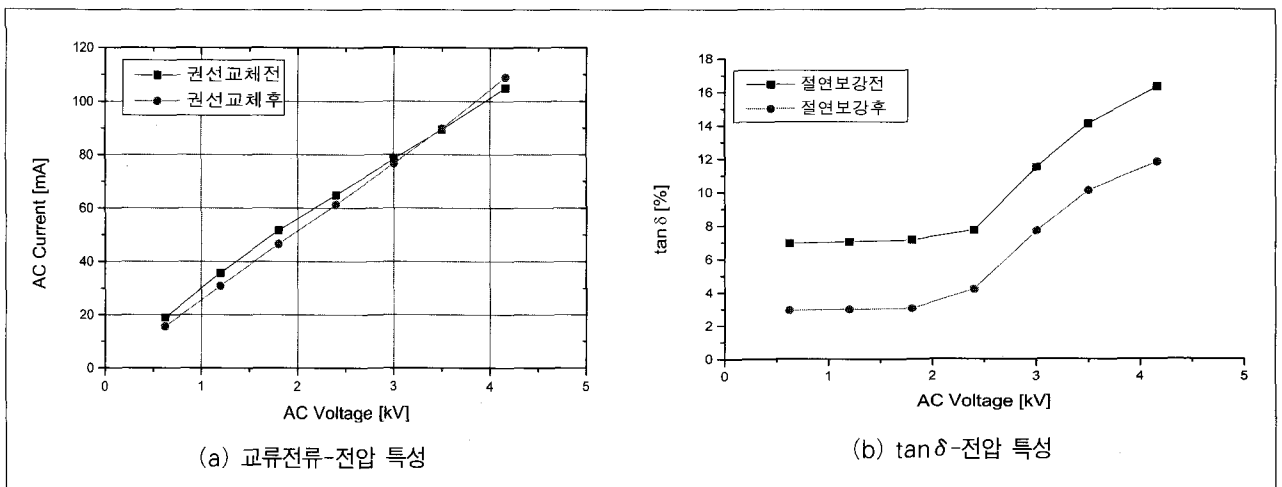
그림 6에 원자력발전소에서 20년 동안 운전한 고압전동기(290kW, 4.0kV) 고정자 권선에서 권선 교체 전후

에 교류전류와 유전정접의 변화를 나타내었다. 그림 6(a)와 같이 교류전류 급증점이 낮고 그림 6(b)에서 나타낸 바와 같이 유전정접값이 높으며, 전압 증감에 따라 초기 측정값에서 큰 차이가 발생할 때 권선 교체를 판정한다. 그림 6(a), (b)에서 나타낸 바와 같이 권선 교체 후에는 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등이 양호하게 분석된다.

표 5에 국내 고압전동기 수리작업을 시행하고 있는 두 개 회사에서 재권선 작업후에 교류전류(ΔI), 유전정접($\Delta \tan \delta$) 및 부분방전 크기 등을 측정한 결과를 나타내었다. A사의 고압전동기(1,200kW, 4.0kV) 진단 결과는 거의 발전기 고정자 권선의 결과와 일치하며, B사의 고압전동기(3,900kW, 6.6kV)도 매우 양호하게 분석되었다. 이와 같이 국내 고압전동기 수리업체의 품질이 거의 새로운 전동기의 특성과 일치하고 있음을 알 수 있다.

〈표 5〉 재권선 고압전동기의 절연진단 결과

기기명	ΔI (%)		$\Delta \tan \delta$ (%)		부분방전 크기(pC)	
	A사	B사	A사	B사	A사	B사
고압전동기	0.39	5.21	0.54	3.22	1,700	1,300




〈그림 6〉 권선교체 전후에 교류전류와 유전정접의 비교

5. 맺음말

정지중에 발전기 120대 및 고압전동기 2,800대의 고정자 권선에서 절연진단을 수행하고 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 종합적으로 분석하여 절연상태를 평가한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 발전기 120대 및 고압전동기 2,550대는 양호하게 평가되었으며, 고압전동기 중에 요주의 45대, 분해점검 90대, 절연보강 65대 및 권선 교체 50대를 판정하였다. 특히 고압전동기 고정자 권선에 이물질 유입으로 인해 회전자를 인출하여 세척작업 후에 절연진단을 수행하면 거의 모든 전동기가 양호한 상태로 판정되었으며, 슬롯방전으로 인해 절연보강을 완료하면 부분방전 크기가 현저하게 감소하였다.

- (2) 고압회전기를 단순히 운전 연수에 따라 분해점검, 절연보강 및 권선 교체 등을 결정하는 것보다 직접적으로 절연진단을 통해 평가하는 것이 훨씬 더 과학적이고 경제적인 방법이다. 따라서 전력설비, 화학설비 및 철강설비 등과 같은 산업체에서 사용되는 고압회전기를 주기적으로 절연진단을 실시하여 트렌드(Trend) 관리를 통해 절연열화 상태와 추이를 분석함으로써 예측정비, 수명연장 및 안정적인 운전에 크게 기여할 수 있다.
- (3) 두 개의 수리업체에서 작업한 고압전동기의 절연진단 데이터를 종합적으로 분석한 결과 매우 양호하게 나타났으며, 교류전류(ΔI), 유전정접($\Delta \tan \delta$) 및 부분방전 크기 등이 거의 새로운 전동기의 특성과 일치하고 있음을 알 수 있었다. 

(참 고 문 헌)

- (1) P. Walker and J. N. Champion, "Experience with Turn Insulation Failures in Large 13.2kV Synchronous Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp. 670-677, 1991.
- (2) K. Mreuger, S. Oulski and H. Krivda, "Current Method of Insulation Life Expectancy for Power Apparatus", T. IEE Japan, Vol. 114-A, No. 12, pp. 845-852, 1994.
- (3) 김희동, 이영준, 주영호, "고압전동기 고정자 권선의 절연상태 분석", 전기저널, No. 275, pp. 20-30, 1999.
- (4) R. E. Fenton, B. E. B. Gott and C. V. Maughan, "Preventative Maintenance of Turbine-Generator Stator Windings", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 1, pp. 216-222, 1992.
- (5) 大木正路, 고전압공학, 槇書店, pp. 220-231, 1989.
- (6) Edward Gulski, "Digital Analysis of Partial Discharge", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp. 822-837, 1995.
- (7) A. Wilson, "Slot Discharge Damage in Air Cooled Stator Windings", IEE Proceedings-A, Vol. 138, No. 3, pp. 153-160, 1991.